



## Invisibility devices with realistic material parameters

Galynsky, V. M.; Novitsky, Andrey

*Published in:*  
Proceedings of Optics-2011

*Publication date:*  
2011

*Document Version*  
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

*Citation (APA):*  
Galynsky, V. M., & Novitsky, A. (2011). Invisibility devices with realistic material parameters: . In *Proceedings of Optics-2011* (pp. 673-675) <http://conf-opt.ifmo.ru/index.php?page=main.php>

---

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

4. H. F. Ma and T. J. Cui, *Nature Commun.*, **1**(3), 1–6, (2010).
5. Liu R, *Science*, **323**, 366–369, (2009).
6. A. Alù and N. Engheta, *Phys. Rev. E*, **72**, 016623, (2005).
7. A. A. Zharov and A. A., Zharova, *Bulletin of the Russian Academy of Science: Physics*, **74**, 88-92, (2010).

## УСТРОЙСТВА НЕВИДИМОСТИ С УЧЕТОМ РЕАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СРЕД

Галынский В.М.\*, Новицкий А.В.\*\*\*

\*Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

\*\*Технический университет Дании, Люнбю, Дания

Идеальная маскировка методом волнового обтекания возможна только при использовании сред без дисперсии либо в очень узком диапазоне частот. В данной работе исследуются возможности отклонения материальных параметров маскировочного слоя от идеальных значений, при которых маскировочные свойства сохраняются.

Один из методов маскировки предмета состоит в том, чтобы создать вокруг объекта, который необходимо спрятать, маскировочный слой с определенными свойствами материала<sup>1-4</sup>, а именно, слой должен быть анизотропным и пространственно неоднородным. Тогда электромагнитные волны без отражения проникают в этот слой, огибают спрятанный объект, не покидая пределов маскирующего слоя, и выходят из него так, словно этого слоя не было. Самый простой цилиндрический маскировочный слой можно построить с помощью линейного преобразования, которое переводит цилиндр радиуса  $b$  в кольцо, ограниченное двумя радиусами  $a$  и  $b$  ( $a \leq r' \leq b$ ), согласно формуле<sup>5</sup>:

$$r' = g(r) = a + \frac{b-a}{b} r. \quad (1)$$

В более общем случае, по заданному преобразованию координат  $r' = g(r)$  значения компонент диагональных тензоров диэлектрической и магнитной проницаемостей находятся с помощью граничных условий (условий маскировки) и инвариантности уравнений Максвелла относительно координатных преобразований:

$$g(0) = a, \quad g(b) = b, \\ \varepsilon_r = \mu_r = \frac{r(dg/dr)}{g(r)}, \quad \varepsilon_\varphi = \mu_\varphi = \frac{g(r)}{r(dg/dr)}, \quad \varepsilon_z = \mu_z = \frac{r}{g(r)(dg/dr)}. \quad (2)$$

На практике любой материал обладает дисперсией, материальные параметры зависят от частоты, к тому же среда обладает поглощением в согласии с соотношениями Крамерса-Кронига. Эти факторы в совокупности приводят к ухудшению маскирующих свойств: формулы (2) задают параметры слоя для некоторой рабочей частоты  $\omega_0$ , а для других частот условия маскировки не выполняются. Выделим частотную зависимость в явном виде:

$$\varepsilon(r, \omega) = \mu(r, \omega) = \chi(r) F(\omega), \quad (3)$$

где  $\chi(r)$  — тензор проницаемости на рабочей частоты  $\omega_0$ ,  $F(\omega)$  — диагональный тензор зависимости от частоты. В первом приближении  $F(\omega)$  вблизи рабочей частоты

можно представить в виде  $F(\omega) \approx 1 + \gamma \Delta\omega$ ,  $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ . Для преобразования (1) материальные параметры маскировочного слоя вблизи рабочей частоты в первом приближении имеют вид:

$$\begin{aligned}\varepsilon_r(r, \omega) &= \frac{(r-a)}{r} (1 + \gamma_r \Delta\omega), & \mu_r(r, \omega) &= \frac{(r-a)}{r} (1 + \delta_r \Delta\omega), \\ \varepsilon_\phi(r) &= \frac{r}{r-a} (1 + \gamma_\phi \Delta\omega), & \mu_\phi(r, \omega) &= \frac{r}{r-a} (1 + \delta_\phi \Delta\omega), \\ \varepsilon_z(r, \omega) &= \frac{b^2(r-a)}{r(a-b)^2} (1 + \gamma_z \Delta\omega), & \mu_z(r, \omega) &= \frac{b^2(r-a)}{r(a-b)^2} (1 + \delta_z \Delta\omega).\end{aligned}\quad (4)$$

Для исследования поля, рассеянного на неоднородной и анизотропной цилиндрической оболочке была разработана программа с помощью метода <sup>6</sup>. По заданным параметрам слоя (4) рассчитывалось сечение рассеяния для падающей на цилиндр, перпендикулярно его оси, электромагнитной ТЕ или ТМ волны. Слой считался маскировочным, если сечение рассеяния во всех направлениях было меньше -15 децибел (на рабочей частоте, как правило, не превышало -20 децибел).

Оказалось, что некоторые компоненты тензоров проницаемостей маскировочного слоя более чувствительны к дисперсии, чем другие. Так, для **ТМ волны** параметр  $\varepsilon_z$  может меняться в пределах от -0,3% до 1%,  $\mu_r$  и  $\mu_\phi$  — от -0,6% до 2%, в то время как  $\varepsilon_r$ ,  $\varepsilon_\phi$ ,  $\mu_z$  могут отклониться от -6% до 20%, а слой еще будет вести себя как маскировочный. Большое отклонение для последних трех параметров обусловлено тем, что они не задействованы явно при прохождении ТМ волны. Для **ТЕ волны** обратная ситуация:  $\varepsilon_r$ ,  $\varepsilon_\phi$  могут отклониться от -0,6% до 2%,  $\mu_z$  — от -0,3% до 1%, а  $\varepsilon_z$ ,  $\mu_r$  и  $\mu_\phi$  — от -6% до 20%. В случае, когда на цилиндр падает **суперпозиция из ТЕ и ТМ волн**, максимальные отклонения следующие: для  $\varepsilon_r$ ,  $\mu_r$  возможно отклонения от -0,5% до 1,5%, для  $\varepsilon_\phi$ ,  $\mu_\phi$  — от -0,6% до 2%, а для  $\varepsilon_z$  и  $\mu_z$  — от -0,3% до 1%. Если же величина  $\gamma \Delta\omega$  сразу для одного или нескольких параметров мала (меньше 0,1%), то указанные выше пределы отклонения для оставшихся параметров можно расширить в 2–3 раза. Зная максимальное допустимое отклонение  $\delta_i \Delta\omega$ ,  $\gamma_i \Delta\omega$  для материальных параметров, при котором слой все еще сохраняет маскировочные свойства можно определить рабочий диапазон частот устройства в каждом конкретном случае.

Для расширения диапазона частот, в котором будут сохраняться маскировочные свойства необходимо использовать метаматериалы без дисперсии, например, такие как в работе <sup>7</sup>, либо вместо преобразования (1) попробовать подобрать более сложное  $g(r, \omega)$ , с частотной зависимостью и попытаться подобрать  $\varepsilon(r, \omega)$ ,  $\mu(r, \omega)$ , которые будут меняться согласовано, всегда оставляя слой маскировочным.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, тема №Ф10М-021.

1. J.B.Pendry, D. Schurig, D.R. Smith, *Science*, **312**, 1780–1783, (2006).
2. U. Leonhardt, T.G. Philbin, *Prog. Opt.*, **53**, 69–152, (2009).
3. А.Е. Дубинов, Л.А. Мытарева, *УФН*, **180**, 475–501, (2010).
4. А.В. Кильдишев, В.М. Шалаев, *УФН*, **181**, 59–70, (2011).
5. U. Leonhardt, T.G. Philbin, *New J. Phys.*, **8**, 247, (2006).

6. A.V. Novitsky, *J. Phys.: Condens. Matter*, **19**, 086213, (2007).
7. H.S. Chen, L. Huang, X.X. Cheng, H. Wang, *Progress In Electromagnetics Research*, **115**, 317, (2011).

## **ШИРОКОПОЛОСНАЯ МАСКИРОВКА В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ**

**Ягупов И.В., Ходзицкий М.К.**

Санкт-Петербургский государственный университет информационных  
технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

Исследовано маскирующее устройство на основе гофрированного покрытия в микроволновом диапазоне частот. Обнаружена широкая полоса пропускания 3 ГГц в диапазоне частот 9-12 ГГц. Показана возможность управления шириной и формой этой полосы с помощью изменения емкости между металлическими пластинами в гофрированном покрытии.

В настоящее время разработка устройств, позволяющих скрыть объект, представляет интерес как с фундаментальной (разработка теорий по невидимости) точки зрения, так и с прикладной (разработка дизайнов маскирующих устройств).

На данный момент разработаны типы маскирующих покрытий на основе метода трансформационной оптики<sup>1,2</sup>, плазмонной маскировки<sup>3</sup> и др. Так, например, использование трансформационной оптики позволяет создать множество различных маскирующих структур, такие как: цилиндрическая оболочка из кольцевых резонаторов<sup>2</sup>, эллиптический цилиндр<sup>4</sup>, маскирующая оболочка с ломаной границей в форме птицы<sup>5</sup>, оболочки в виде сфероида<sup>6</sup>, маскировка плоским слоем<sup>7</sup>, маскировка с помощью LC – цепи<sup>8</sup>. Однако все эти методы работают в узкой полосе частот. На данный момент невидимость на основе данных методов трудно реализуема из-за отсутствия материалов, обладающих экстремальными значениями материальных параметров, поэтому приходится искать иные способы маскировки.

Для практического применения особый интерес представляет маскировка в широкой частотной полосе в микроволновом диапазоне. Один из вариантов дизайна такого маскирующего покрытия - это структура из цилиндрического гофрированного покрытия<sup>9</sup>. В данной статье исследуется возможность управления шириной и формой частотной полосы невидимости за счет изменения параметров конденсаторов, помещенных между парами металлических пластин, в диапазоне частот 8 – 12 ГГц.

Исследуемое маскирующее покрытие представляет собой структуру из цилиндрического гофрированного рассеивателя, который состоит из набора металлических пластин, изолированных диэлектрической оболочкой от скрываемого объекта. Между парами пластин расположен диэлектрик. Внутри гофрированной структуры помещается объект, который хотят замаскировать (Рис. 1). Взаимодействие электромагнитной волны с маскирующим покрытием было смоделировано в среде трехмерного моделирования CST Microwave Studio 2011 (Рис. 1а). Структура “объект-покрытие” помещалась в волновод с сечением 23x10 мм. Для подтверждения теоретических расчетов был разработан экспериментальный макет маскирующего покрытия (рис. 1б). Вместо металлического гофрированного покрытия было использовано оргстекло, обтянутое слоем фольги.